

## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

### تعیین نسبت چسبندگی به آنتروپی پلاسمای کوآرک گلوئون در برخورد یون‌های سنگین با استفاده از فاکتور توقف سازی هسته‌ای

شراره محرابی پری<sup>۱</sup>، کوروش جاویدان<sup>۲</sup>، فاطمه تقوی شهری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، مشهد

#### چکیده

تأثیر تغییرات چسبندگی به آنتروپی بر روی فاکتور توقف سازی هسته‌ای در برخورد طلا-طلا در انرژی RHIC برای کوآرک‌های  $c$  و  $b$  منتشر شونده از درون پلاسمای کوآرک گلوئونی با استفاده از روش لاپلاس متوالی محاسبه شده است.

#### مقدمه

برخورد هسته‌های سنگین در شتابدهنده‌ها شرایطی را که کاملاً مشابه شرایط پس از انفجار بزرگ است، ایجاد می‌کنند. در چنین محیطی، پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده هسته ذوب شده و کوآرک‌ها از قید نیروی مقید کننده هسته‌ای قوی رها می‌گردند. این فاز جدید از ماده پلاسمای کوآرک گلوئونی نام دارد و ویژگی‌هایی را از خود نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به سیال کامل است و توسط مدل‌های هیدرودینامیکی توصیف می‌شود. زمان رسیدن به تعادل محلی کوآرک‌های سنگین با جرم  $M$  در دمای  $T$  بزرگتر از کمیت مشابه برای پارتون‌های سبک است و سریع‌تر از دیگر ذرات منتشر شونده در پلاسمای کوآرک گلوئونی به تعادل محلی می‌رسند، بنابراین بررسی کوآرک‌های سنگین اهمیت قابل توجهی دارد. معادله انتقالی بولتزمن، سیستم آماری غیرتعادلی را به صورت زیر توصیف می‌کند [1]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) = \gamma \frac{\partial}{\partial p_i}(pf) + D \left[\frac{\partial}{\partial p}\right]^2 f \quad (1)$$

که در آن  $p$  تکانه کوآرک سنگین،  $f(x, p)$  توزیع تکانه کوآرک سنگین،  $D, \gamma$  ثابت‌های کشش<sup>۱</sup> و پخش<sup>۲</sup> هستند که دینامیک برخورد را در خود دارند. در این مقاله هر دو فرآیند اتلاف انرژی، اتلاف برخوردی حاصل از برخورد کوآرک‌های سنگین با ذرات تشکیل دهنده حمام گرمایی و اتلاف تابشی در محاسبات در نظر گرفته شده‌اند [2]. ماده چگال و داغ شکل گرفته بعد از زمان بسیار کوتاهی در حد  $\tau_0 = 0.33 fm/c$  به تعادل محلی دست می‌یابد و بر اثر برهمکنش‌های قوی انبساط یافته و با گذشت زمان سرد می‌شود، در حالی که مانند یک مایع کامل با چسبندگی نزدیک به صفر رفتار می‌کند. جفت شدگی قوی وابسته به دما طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [3]:

$$\alpha_s(T) = \frac{6\pi}{(33 - 2n_f) \ln \frac{19T}{\Lambda_{MS}}} \quad (2)$$

<sup>۱</sup>drag

<sup>۲</sup>diffusion

## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

که  $n_f$  تعداد ذرات تشکیل دهنده پلاسما را نشان می‌دهد و  $\Lambda_{MS} = 80 MeV$ . مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که پلاسمای کوآرک گلوئونی بیشتر مانند یک سیال کامل رفتار می‌کند با مشخصاتی مانند چسبندگی‌ها و رسانش گرمایی نزدیک به صفر تا مانند گازی که شامل کوآرک‌ها و گلوئون‌های آزاد است. چسبندگی برشی یا اصطکاک داخلی سیال، توانایی انتقال تکانه در مسافت آزاد میانگین را نشان می‌دهد. بنابراین در پلاسمای کوآرک گلوئونی جایی که ذرات با یکدیگر برهمکنش قوی دارند، انتقال تکانه به راحتی انجام می‌شود که نتیجه آن مقدار بسیار کوچک چسبندگی برشی  $\eta$  خواهد بود. در تئوری هیدرودینامیک چسبندگی مرتبه اول، معادله دیفرانسیلی که تحول دما برحسب چسبندگی را نشان می‌دهد به صورت زیر فرمول بندی شده است [4]:

$$T = T_0 \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \frac{2}{3\tau_0 T_0} \frac{\eta}{s} \left( 1 - \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \right] \quad (3)$$

$s$  آنتروپی است و  $T_0$  و  $\tau_0$  به ترتیب عبارتند از دما و زمان اولیه‌ای که سیستم شکل گرفته پس از برخورد به تعادل محلی می‌رسد. با دانستن ورودی‌های لازم معادله فوکر-پلانک که عبارتند از ثابت‌های کشش، پخش و توزیع تکانه عرضی اولیه ذرات سنگین [5]، می‌توان به حل آن معادله پرداخت. در این مقاله از روش تبدیل لاپلاس متوالی<sup>۳</sup> (ILTM) به عنوان کارآمدترین روش در حل معادلات دیفرانسیلی استفاده شده است. این روش جواب‌های عددی را به شکل سری همگرا می‌دهد. جزئیات محاسباتی این روش در مرجع [6] قابل مشاهده است. اگر فرم کلی معادله فوکر-پلانک به شکل زیر باشد:

$$D_t^\alpha f = \gamma \frac{\partial f}{\partial p} + D \frac{\partial^2 f}{\partial p^2} \quad (4)$$

با شرط اولیه  $f(p, t=0) = p$  که  $D^\alpha$  مشتق مرتبه  $\alpha$  زمانی  $f$  می‌باشد. جملات سری همگرا با اعمال ILTM عبارت خواهند بود

$$f_0 = f(p, t=0) = p$$

$$f_1 = \frac{\Delta t}{1} \left\{ \gamma(p) \frac{\partial}{\partial p} (pf) + D(p) \left[ \frac{\partial}{\partial p} \right]^2 f \right\}_{f=f_0} \quad \text{از:}$$

$$f_{m+1} = \frac{\Delta t}{m} \left\{ \gamma(p) \frac{\partial}{\partial p} (pf) + D(p) \left[ \frac{\partial}{\partial p} \right]^2 f \right\}_{f=f_m} \quad (5)$$

نسبت تعداد الکترون‌های تولید شده در واحد rapidity و واحد تکانه عرضی در برخورد هسته-هسته نسبت به برخورد پروتون-پروتون، فاکتور توقف سازی هسته‌ای نام دارد [7]:

$$R_{AA}(p_T) \equiv \frac{dN^{(D+B)}_{Au+Au} / d^2 p_T d\eta}{dN^{(D+B)}_{p+p} / d^2 p_T d\eta} \quad (6)$$

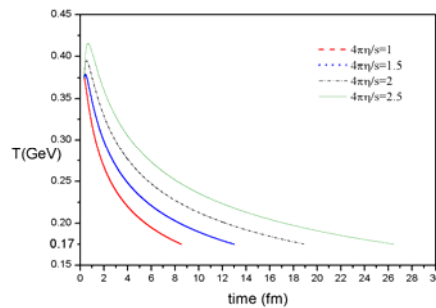
این کمیت دلالت دارد بر اتلاف انرژی ذره در حین عبور از داخل پلاسمای کوآرک گلوئونی. تحول زمانی توزیع تکانه کوآرک‌های سنگین  $c$  و  $b$  در برخورد طلا-طلا با انرژی مرکز جرم  $\sqrt{s} = 200 GeV$  تا شروع فاز هادرونی در دمای گذار  $T_c = 175 MeV$  محاسبه شده است.

<sup>3</sup> Iterative Laplace Transform Method (ILTM)

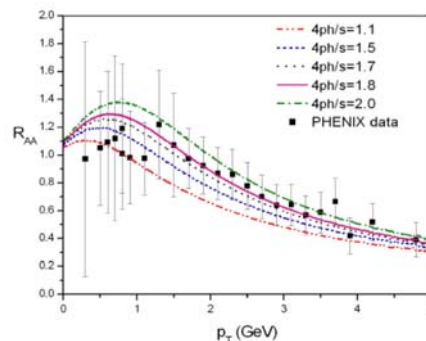
## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

تغییرات دما بر حسب زمان برای برای نسبت چسبندگی به آنتروپی‌های مختلف در شکل (1) قابل مشاهده است. شکل (1) نشان می‌دهد که مقدار بزرگ چسبندگی برشی باعث کاهش سرعت انبساط سیستم شده و زمان رسیدن به تعادل محلی را افزایش می‌دهد که نتیجه آن کاهش اتلاف انرژی ذره خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی شده عددی فاکتور توقف سازی هسته‌ای با روش ILTM با شرایط اولیه اشاره شده در بالا و داده‌های بدست آمده از گروه تحقیقاتی

PHENIX [8] برای کوارک‌های c و b به ازای  $4\pi\eta/s$  های مختلف در شکل (2) رسم شده‌اند.



شکل ۱: تغییرات دما بر حسب زمان برای  $\eta/s$  های مختلف



شکل 2: فاکتور توقف سازی هسته‌ای کوارک‌های c و b برای  $\eta/s$  های مختلف در برخورد طلا-طلا

همان طور که در شکل دیده می‌شود، نتایج شبیه سازی در توافق خوبی با داده‌های تجربی می‌باشند. نتایج بدست آمده از هیدرودینامیک چسبنده، حد پایین و بالای چسبندگی برشی به آنتروپی پلاسمای کوارک گلوئونی را به ترتیب  $1/4\pi$  و  $2/4\pi$  تعریف کرده است. با توجه به شکل بهترین مقدار  $4\pi\eta/s$  معادل است با  $1.7 \pm 0.1$ .

### نتیجه گیری

بهترین مقدار بدست آمده برای چسبندگی با توجه به فاکتور توقف سازی هسته‌ای، در توافق با نتایج حاصل از مدل‌های تئوری می‌باشد. به علاوه روش ILTM جوابی همگرا می‌دهد و می‌توان دقت محاسبات را تا هر مرحله دلخواهی افزایش داد.

## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

مرجع‌ها

1. B. Svetitsky, *Phys. Rev. D* 37 ,2484( 1988).
۲. E. Braaten and M. H. Thoma, *Phys. Rev. D* 44, 9 (1991).
۳. R. Vogt and P. Levai, *Phys. Rev. C* 56, 2707 (1997).
۴. R. Baier, P. Romatschke and U. A. Wiedemann, *Phys. Rev. C* 73, 064903 (2006).
۵. M. Cacciari, P. Nason, R. Vogt, *Phys. Rev. Lett.* 95, 122001 (2005).
۶. L. Yan, *Hindawi Publishing Corporation*, Volume 2013, Article ID 465160.
۷. K. Das, S. Ghosh, S. Sarkar and J. Alam, *Phys. Rev. D* 88, 017501 (2013).
8. S. S. Adler et al., (PHENIX Collaboration), *Phys. Rev. C* 84, 044905 (2011).